

システムダイナミックスにおける 定性的概念の定量化手法について

——羽生市ダイナミックモデルを一事例として——

坂 部 創 一

はじめに

システムダイナミックス（以降SDと略）は、1958年にマサチューセッツ工科大学のJay W. Forrester（以降Forresterと略）教授らによって創始されたIndustrial Dynamics（ID）の手法を発展させたものであり、システムの動的特性、システムの各種要因の相互間連の分析を目的としているシミュレーターである。

SDは、種々のシステムの中でも主に複雑な社会システムを分析する手段として適用されることが多く、社会システムの中で観察された断片的な情報を、人間の知識とコンピュータとの共同作業で総合化する情報科学の有効な一つの手段となっている。

また、SDは、社会システムを分析する手段として、非常に興味をつきないテーマを我々に提供してくれる。それは、社会システムは、人間の精神活動が伴うため、有形な物財等の他に無形の個性的・主観的要素の強い価値観や魅力等の定性的概念を考慮せざるを得ないからである。

しかし、このような定性的概念を、どのようにSDの中で定量化し、実証科学の立場で情報の処理を行っていくかということは、SD研究者にとって大きな課題となっている。

そこで、本稿では、SDにおける定性的概念の定量化手法の現状を論じた後、その一つの事例研究として、羽生市ダイナミックモデルの中の地域環境魅力の定量化手法とそれに関わるシミュレーションの結果について、具体的に詳しく述べてみたい。

I SDにおける定性的概念の 定量化手法の現状

ここでいう定性的概念とは、愛、幸福、意欲、苦しみ、魅力、価値観等の個性的・主観的要素の強い概念のことである。これらは、金額、重量等のように一義的な定量化は容易ではない。しかし、種々の制約や限界を抱えながらも関係学問領域において、意欲的に定量化の試みが行われている。それは、理論的仮説が、現実のデータと適合しているかどうかという実証科学の立場を重視するからである¹⁾。

SDを適用する対象の社会システムは、自然と物財的な環境との相互作用を行いながら、人間集団がダイナミックに展開する動的なシステムである。そのためモデル化の過程において、定量的なデータの他に定性的概念の導入とその定量化も重要になる。

SDの特徴として一般的によく言われることは、計量経済学や統計学のようなデータ依存型の手法ではなく、構造依存型の手法であるということである。事象の因果律を優先するため、パラメータの精度は、感度分析を行い、それがシステムに敏感であることが分かった場合に、その精度を高める検討を行う。それまでは、不足しているデータは、仮説的なテーブル関数を用いて設定する。

社会システムは、人間の精神的な部分が多く

1) 例えば、価値観と環境満足度に関連があると仮説を設定しても実際にアンケートを実施し、相関分析、因子分析等を行ってみないと具体的な関連の内容と程度が分からないし、相関係数の統計学的検定（理論的仮説の検証を意味する）も行えないからである。

関与するため、本質的にデータが欠けているシステムである。このようなシステムを分析する手段としては、現在のところSDは比較的優れた手段であることには異論がない。

しかし、SDで議論の対象となり易いのは、このデータの入手あるいはデータ化・モデル化が容易でない定性的概念の定量化の問題である。また、モデル作成者の立場からいっても多くの時間と独創性が要求されるテーマでもある。

ところが、わが国においては、これに関する基礎的な研究がそれほど多くない。また、行われていても、内容の公表が概要のみであるケースが多く、それが日本においてSD研究の進展が遅れている一つの原因になっているように思える。

SDでは、定性的概念を定量化する方法として、通常次のような過程を経ることが多い(図1)。

まず定性的概念について要因分析を行い、構成要素を抽出する。次に、その構成要素に該当するあるいは代替できるデータを準備するが、それが不可能なデータは、仮の値を設定する。モデル化の手法としては回帰分析、テーブル関数等を用いることが多い。そのモデルでどの程

度過去の実績値を再現できるかという部分テストを行い、適合率が悪ければ再度データの見直しとモデルの改良を行う。部分テストが終了した後は、SDモデル全体を実行しその結果に矛盾がないかどうかをチェックする。その後、また部分的なモデルに戻り、感度分析を行う。感度分析とは、部分的な変化が全体に及ぼす影響度分析で、その度合が大きければシステムに敏感であるので、モデルのパラメータの精度を高める検討を行い、さらなる改善の余地があればそれを行う。SDでは、これらの作業に多くの時間と労力がとられるので、手順過程をいかに効率化するかが重要となる。例えばSDを地域問題に適用した都市モデル(Urban Dynamics)においては、地方公共団体で実際に政策課題の基礎資料とするケースも多く、モデルの作成に許される時間も充分でない場合が多いので、いかに効率よく実用的なモデルを作成するかが要求されることになる。

日本でも、現在までに数多くの都市モデルが作成され、論文や報告書としていくつか発表されてきたが、前述の定性的概念の定量化手順を具体的にかつ詳細に述べているものは数少ない。ほとんどが、概要の記述のみに終わっているのが現状である。これは、SDの実行結果が特定の地方公共団体の政策変数に直接影響を及ぼしているため、外部に公表する場合に詳細に記述することを差し控えていることが原因の一つになっていると思われる。また、例えば、地域環境魅力等のような総合的な概念を定量化することは容易ではなく、その改良が課題のまま残されて終わっているケースも多いと推測される。

そこで、本稿では、SDにおける定性的概念の定量化手法の一事例として、筆者が実際に携わった羽生市ダイナミックモデルの中の地域環境魅力の定量化の方法とそれに関わるシミュレーションの実行結果を中心に、具体的に詳しく論じてみることにする。事例研究として都市モデルを選択した理由は、わが国でSDが最も多く利用されかつ報告されている分野はアーバン・ダイナミクスであり、既存の都市モデル

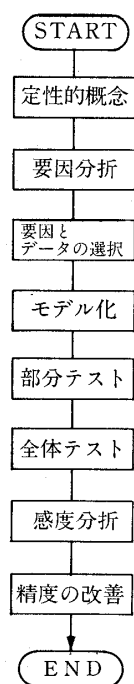


図1 定性的概念の定量化手順の概要

が多く開発されているので、それらを引用・比較する事が容易なためである。

Ⅱ 羽生市ダイナミックモデルにおける事例研究

1. 羽生市ダイナミックモデルの概要

このモデルはその実行結果を、埼玉県羽生市の将来計画の基礎資料とするため、1988年に羽生市役所から委託を受けて開発した。主に、2000年の年齢階層別の人口数を予測し、それを市の公共施設等の整備計画の根拠とするためである。それに併せて、21世紀計画の参考資料とするため2000年以降の人口動態についても、シミュレーションを行った。手法は、SD法を採用し、SD専用言語のDYNAMOで実行した。

現在、地域の人口を推定する主な方法としては、次の六つがあげられる。

- ① 数学的方法（総数延長法・例 ロジスティック曲線）
- ② 社会経済指標分析
- ③ コーホート要因法（年齢階級別積み上げ法）
- ④ 人口要素分解法
- ⑤ マトリックス法
- ⑥ SD法

この中から、SD法を選択した理由は、SDが①～④の手法をも包含し、複雑で非線形的な要因間の関連を扱える比較的優れたシミュレーション手法であると判断したからである。

羽生市ダイナミックモデルのSDフローは、図2のとおりである。これは、実際のモデルを本稿用に簡略化したものである。全システムは、人口セクター、経済セクター、住宅セクターの三つのセクターから構成されている。

人口セクターは、年齢階層を、幼年人口（0～6歳）、若年人口（7～18歳）、労働者人口（19～64歳）、高齢人口（65歳～）の四つに区分している。人口の増減は、自然動態としては出生数、死亡数により変化が生じ、社会動態としては転入数、転出数により増減する。また、各年齢階層間の移行は平均移行人口を用いている。

経済セクターは、第1次、第2次、第3次産業の生産額を就業人口と投資額により求め、その総額をもとに推計した市民所得を総人口で除することにより1人当たり市民所得を推定している。

住宅セクターにおいては、住宅数は、建設と取り壊し数により決定される。建設率は、住宅の不足度を示す住宅比と土地利用可能度の影響を受け、取り壊し率は住宅の平均寿命から推定する。

各セクターの関係は、経済セクターは、人口セクターの地域環境魅力乗数に影響を及ぼし、住宅セクターは、人口セクターの転入総数を補助的に調節変動させる一つの要因になっている。住宅供給量は、地域環境魅力を構成する一つの要因になり得るが、モデルを作成するときに正確な時系列のデータが得られないため、図2の転入・転出を促す環境魅力乗数の直接的な要因としては含めておらず、仮のデータを用いる補間的なセクターとしている。

2. 地域環境魅力を構成する要因について

都市モデルでは、人口動態を自然動態と社会動態とに区別する。自然動態は、出生率、死亡率に左右されるが、後者はその要因がより複雑である。そこで、社会動態を分析する場合は、地域環境魅力のような総合的概念を想定する場合が多く、他地域との相対的魅力により人口の移動が起こるという仮説を設定する。

人口の増減は、この魅力という定性的概念をどうとらえ、定量化するかによって予測結果にかなりの差が生じてしまう。既存のモデルでは、この魅力という概念をどのように把握し、パラメータを設定しているかを示しているのが表1である。

この表の中の魅力乗数名の乗数の意味は、地域環境の魅力による転入・転出率を増減させるための掛け合わせる係数ということである。Forresterが、Urban Dynamicsの中で乗数という言葉を使用して以来、一般的に用いられるようになっていく。

図2 羽生市人口予測モデルのSDフロー図

魅力乗数名は、各モデルにおいて異なっている。また、⑨のサスケハナモデルは魅力乗数という名称は使用していない。しかし、内容的には、失業率、技能乗数を地域環境の魅力を構成する要因としてとらえることができる。

魅力乗数は、①の就業型・居住型、②の資本・住民のように魅力を区分しているもの、あるいは、総合魅力のように統一的に処理している等種々のケースがある。このような相違は、システム分析者の視点、モデル作成の目的、対象地域の特徴等により生じてくる。

表1の魅力要因とは、各魅力乗数の構成要因であるが、全体的に就業と住宅に関する項目が多い。

本稿のモデルでも、一般的な転入・転出の動機と考えられるものとして地域環境魅力乗数の構成要因を表2のように設定した。大きくは、就業型・居住型の二つに区別し、さらに具体的なデータ例としていくつか例示してある。

3. 定量化の方法と要因・データの選択

表 1 に既存の各モデルにおけるパラメータの

表1 既存モデル・魅力乗数の比較

モデル名	魅力乗数名	魅力要因	パラメータ設定
① 埼玉ダイナミックモデル ^{a)b)}	<ul style="list-style-type: none"> ・就業型流入魅力乗数 ・居住型流入魅力乗数 ・就業型流出魅力乗数 ・居住型流出魅力乗数 	雇用機会, 所得水準 生活環境 汚染, 住宅, 地価, 交通, 交通安全, 混雑 雇用機会, 所得水準 生活環境 汚染, 住宅, 地価, 交通, 交通安全, 混雑	回帰分析 次元付き変数
② 広島市ダイナミックモデル ^{c)}	<ul style="list-style-type: none"> ・資本都市魅力 ・住民都市魅力 	社会資本, 道路, 鉄道 生活関連の社会資本	専門家へのアンケート調査
③ 兵庫ダイナミックモデル ^{d)}	<ul style="list-style-type: none"> ・環境魅力乗数 	環境汚染, 混雑度 1人当り県民所得 就業人口	専門家の意見をとりいれる
④ 大阪ダイナミックモデル ^{e)}	<ul style="list-style-type: none"> ・魅力関数 	交通状態, 雇用機会 新規立地ポテンシャル 利用可能土地率, 用水 余剰率, 住民パワー 同種企業集積メリット 住宅不足率	経験, 実態分析 に基づくシミュレーション修正 法
⑤ 西宮モデル ^{f)}	<ul style="list-style-type: none"> ・転入魅力乗数 ・転出魅力乗数 	住宅, 立地, 居住 住宅, 立地, 居住	定式化の難しい 乗数は, 市職員の 主観的判断値の 平均値を設定
⑥ 前橋モデル ^{f)}	<ul style="list-style-type: none"> ・転入乗数 ・転出乗数 	就業機会 住宅取得機会 周辺町村の居住魅力 (住宅, 教育, 交通) 市内の居住魅力 (人口密度, 教育機会, 生活基盤投資)	市職員やシステム 分析者の直感
⑦ アーバン・アセスメント・モデル ^{g)}	<ul style="list-style-type: none"> ・都市総合魅力乗数 	生活関係過密指標 交通通信関係過密指標 外部経済指標 消費者向集積指標	回帰分析
⑧ アーバン・ダイナミックス ^{h)}	<ul style="list-style-type: none"> ・魅力乗数 	不完全就業者到着移動 性乗数, 不完全就業者 /住宅乗数, 公共費乗 数, 不完全就業者/仕 事乗数, 不完全就業者 用住宅プログラム乗数	都市問題の実務 家の意見を参考 にしたテーブル 関数
⑨ サスケハナモデル ⁱ⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・人口移動率 ・技能乗数 	失業率, 人口の逆数	回帰分析

- (注) a) 金子昇一 (1976):「都市公共政策のシステム分析」, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 21, No. 3, pp.129-135.
 b) 都市解析研究委員会編 (1974):OR 手法による都市問題解析型シミュレーションモデルに関する調査研究, 日本オペレーションズ・リサーチ学会.
 c) 北島弘行, 佐々木良一 (1976):「都市政策効果の分析モデル」, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 21, No. 3, pp.136-142.
 d) 松崎功保, 宮崎秀紀 (1976):「SDによる長期総合計画策定支援システム」, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 21, No. 3, pp.143-151.
 e) 室井明 (1976):「ダイナミック・モデルによる都市の分析と評価」, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 21, No. 3, pp.640-647.
 f) 地方自治情報センター (1976):都市における公共政策シミュレータの研究報告書.
 g) 吉川博也編著 (1975):環境アセスメントの基礎手法, 鹿島出版会, pp.240-263.
 h) J. W. Forrester (1969): *Urban Dynamics*, M. I. T. Press.
 i) H. R. Hamilton & Others (1969): *Systems Simulation for Regional Analysis; An Application to River Basin Planning*, M. I. T. Press.

表2 地域環境魅力の構成要因

就業型	求人倍率, 失業率, 所得水準 (1人当り)
居住型	環境汚染度 (例・公害苦情件数) 住宅水準 (例・1人当り畳数, 住宅比), 地価 交通 (例・都心距離, 通勤時間, 交通事故率) 混雑度 (例・人口密度), 犯罪率 気候 (例・年平均気温), 教育水準 (例・進学率)

設定法を示してあるが、①～⑤、⑦のモデルに関しては、概要のみしか述べられておらず具体的な構造方程式とパラメータの検定結果やテーブル関数の型に関しては、筆者の入手した資料においては不明である。また、公開されている資料には表1のような抽象的な表現だけで具体的な手法が明記されていないモデルもあるが、その内容から判断するとテーブル関数は②～⑤と⑧に、回帰分析は①、⑦、⑨に適用されていると思われる。

⑧のForresterのアーバン・ダイナミックスでは、都市問題の実務家の意見を参考にしたテーブル関数を用いているが、仮想都市を設定しているため実際のデータとの適合率に関する詳しい論述がない。

⑨のサスケハナモデルは、米国北東部のサスケハナ河流域の経済分析と同流域の水資源が将来の経済発展にどのような役割を果たすか、また果たすことができるかを明らかにしようとするものである。このモデルでは、人口の移動量を人口移動率と技能乗数で推定している。人口移動率は、失業率と人口の逆数の二つを説明変数とする回帰モデルで算出しているが、年齢階層別の回帰モデルの決定係数が0.2～0.6の範囲の値であり、あまり適合率が良いとはいえない。

⑥の前橋モデルは、データ間の相関が低く回帰方程式が作成できないので、理論的仮説による構造方程式を定式化して、パラメータを市職員やシステム分析者の経験や直感によって設定している。その後、システムの全体テストを実行した結果と過去の実績値とを比較している。転入量の適合率は良好であるが、転出量の増減に関してはあまり良いとはいえないようである。

このようにSDにおいて、地域環境魅力を表

1・表2の構成要因等を用いて定量化する手法としては、現在のところ回帰分析、テーブル関数の二つが多く適用されていることが分かる。

魅力という概念は、個人によってそのとらえ方や評価基準が異なるものである。しかし、ある特定の社会集団においては、それに対してマクロ的な傾向性がみられることが多い。その傾向性を定量化する手法として多く用いられているのが回帰分析や、テーブル関数である。

作成したSDモデルの妥当性を評価する場合、過去の実績値をどの程度再現できるかが一つの目安となる。また、予想される将来の構造変化にモデルの中でどのように対処していくかという問題もある。

羽生市ダイナミックモデルにおいては、回帰分析とテーブル関数を組み合わせて総合的に用いた。転入・転出率を推定する構造方程式を作成するときは、回帰分析を適用し、そのモデルの説明変数の将来値の設定にテーブル関数を適用した。前者が、モデルの再現性を重視した手法であり、後者は、将来の構造変化への対処法である。

本稿での定量化の対象は、図2のSDフロー図の転入を促す地域環境魅力乗数と転出を促す地域環境魅力乗数である。それは、推計された転入・転出率を基準年(SDを実行させる際の最初の年度)転入率・転出率で除算することによって算定できる。

地域環境魅力が、統計上の具体的な数値として示されるのは、人口の社会変動を表わす転入量・転出量においてである。それは、総人口に転入・転出率を掛け合わせることによって求められる。そのため本稿のモデルでは、地域環境魅力という定性的概念を転入率・転出率という代理指標でとらえ、それを推定する重回帰モデルを作成した。

具体的な定量化の手順は、次のとおりである。

まず、図1の定性的概念の定量化手順に従って、仮のモデルを実行させ、地域環境魅力乗数がシステムに非常に敏感で、パラメータ設定の仕方でも人口の動態が大きく変化することを確認

した。そこで、パラメータの精度の改善を行った。

転入・転出率を推定するモデルには、前述したように回帰分析を用いている。テーブル関数も試みたが、過去の実績値に合わせる作業に多くの時間と労力がかかる割には良好な結果が得られなかった。テーブル関数は、データが不足している場合に、仮の値として設定できるので便利であるが、時系列のデータが揃っている場合には相関分析をもとにした回帰分析等を適用したほうが効率的、実用的である。なお、テーブル関数は、回帰モデルの説明変数の将来値の設定時に適用している。

回帰分析を行う場合は、時系列の生データを使用することが望ましい。失業率のように国勢調査による5年ごとのデータを単純延長法等で推計し、各年のデータとして使用すると景気変動による変化等が加味されず、回帰分析の信頼性が低下するからである。

そこで、表2の地域環境魅力の構成要因の中から、時系列的に整備され公表されているデータを選択した。それは、所得、地価（住宅地の平均価格）、混雑度（人口密度）、犯罪率（犯罪発生件数／総人口）、交通事故率（交通事故発生件数／総人口）の五つである。データ期間の範囲は、1975～1985年である。これらのデータを地域間の相対値とするため格差データを作成した。それは、地域間の人口移動は、相対的魅力によって発生すると考えられるからである。

ここでの格差データとは、羽生市と人口の転入・転出が行われている地域との各種データにおける相対値であると定義する。相対値には、二地域間のデータ値の差を求める方法と比率を算定する方法がある。前者の方法は、後述する相乗効果を取り入れるため複数要因のデータを掛け合わせるときに、一つでも差が負の場合総合された値も負になり、その符号の解釈が難しくなる。そこで、相対値には、後者の比率法を選択した。比率を求める場合、その値が高くなれば地域の魅力が増すという解釈が可能になるように、除数データと被除数データを選択し除

算した。

羽生市の現在までの転入・転出先の実態は、県内が半数以上を占めているため、回帰モデルにおける羽生市に対する相対的地域を埼玉県とした。そのため格差値は、所得格差（1人当り市民所得／1人当り県民所得）、地価格差（県の住宅地の平均価格／市の住宅地の平均価格）、混雑度格差（県の人口密度／市の人口密度）、犯罪率格差（県の犯罪率／市の犯罪率）、交通事故率格差（県の交通事故率／市の交通事故率）のようになる。

この中で、就業型の格差は、所得格差である。この格差が高くなることは、市民1人当りの所得水準そのもの、あるいは相対的所得が高まることと、地域の相対的な経済的活況が増し、就業機会が増大することなどを意味する。

居住型の格差は、住宅立地機会に関わる地価格差と、社会的安全度を示す交通事故率格差・犯罪率格差と、住み易い空間的ゆとりを示す混雑度格差である。

次に、このように選択作成した五つの格差データが転入・転出率とどの程度の関連があるかを把握するため相関分析を行った。使用したデータは、羽生市の転入率・転出率、五つの格差の基本データの他に、そのデータを組み合わせた25種類の混合データを作成し分析に用いた。また、その他に、転入・転出には認識と行動の遅れも考えられるので、年度遅れ（1年遅れ、2年遅れ、3年遅れ）の3種類のケースも設定した。

混合データを作成した理由は、転入・転出における相乗効果を考慮したからである。人々が、他地域に転入・転出の行動を起こす動機は、単独的要因によるものと複数の要因の相乗効果によるものとが考えられる。混合データは、格差を掛け合わせることによって作成した。組合せの数は、25種類である。

相関分析に用いた相関係数は、ピアソンの相関係数、データを対数変換した場合のピアソンの相関係数、スピアマンの順位相関係数の3種類である。これは、転入・転出率との関係が線

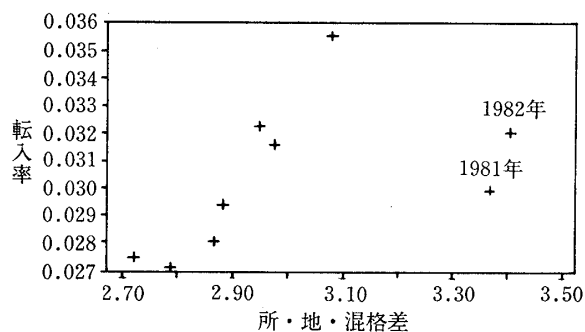


図3 転入率と所・地・混格差(1年遅れ)の相関図

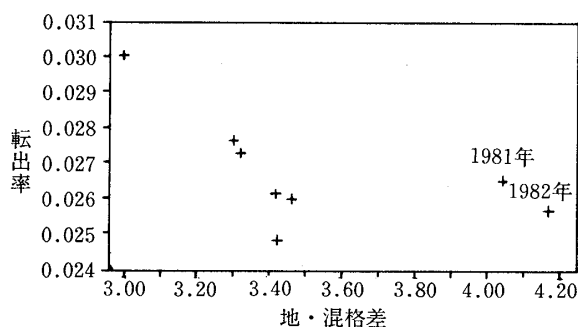


図4 転出率と地・混格差(1年遅れ)の相関図

形か非線形かを判断するためである。前者の相関係数が線形を後者の二つが非線形を判定する際の資料となる。スピアマンの順位相関係数は、データ間の関連を示す傾向線が急勾配の曲線であったり、図3、図4のようなある一定の値を越えると関連がシフトとする場合に有効である(この場合他の二つの相関係数値は、その関連を十分にとらえきれないので低くなる)。

相関分析の結果において、相関係数値の水準を参考にしながら重要と思われたものを表3と表4に示しておいた。この相関係数の表から転入・転出率を説明する構造方程式にどの項目を説明変数として選択するかは、作業仮説と係数値の符号条件・水準による。

作業仮説とは、構造方程式を作成する場合に指針となる仮に設定した仮説のことである。その仮説の正当性は、最終的な構造方程式における各変数のパラメータのt値と決定係数の水準で判断する。

作業仮説は、次の二つである。

- ① 転入・転出の動機は、単一の要因よりも複数の要因の相乗効果による総合的判断に

表3 転入率と格差の相関係数

格 差	同 年	1年遅れ	2年遅れ	3年遅れ
P 所得格差	0.54	0.44	-0.23	-0.42
T	0.57	0.43	-0.24	-0.44
S	0.64	0.21	-0.21	-0.61
P 地価格差	-0.66	-0.16	0.12	0.28
T	-0.68	-0.16	0.14	0.32
S	-0.57	-0.32	0.00	0.57
P 混雑度格差	0.84 *	0.86 *	0.85 *	0.89 *
T	0.84 *	0.86 *	0.85 *	0.89 *
S	0.93 *	0.93 *	0.93 *	0.93 *
P 犯罪率格差	-0.45	0.43	-0.21	0.25
T	-0.47	0.38	-0.18	0.23
S	0.04	0.32	-0.21	0.21
P 交通事故率格差	-0.50	-0.67	-0.67	-0.71
T	-0.48	-0.67	-0.66	-0.68
S	-0.50	-0.82 *	-0.75 *	-0.89 *
P 全格差	-0.71	-0.01	-0.47	-0.26
T	-0.72	-0.04	-0.48	-0.25
S	-0.43	0.00	-0.18	-0.29
P 所・地・混格差	-0.47	0.23	0.31	0.42
T	-0.47	0.26	0.35	0.46
S	-0.07	0.54	0.54	0.71
P 所・混格差	0.70	0.72	0.31	0.15
T	0.72	0.71	0.30	0.10
S	0.75 *	0.54	0.21	-0.25
P 所・地格差	-0.64	-0.02	0.05	0.17
T	-0.65	-0.01	0.06	0.19
S	-0.39	0.14	-0.36	0.21
P 地・混格差	-0.55	0.02	0.29	0.42
T	-0.57	0.04	0.33	0.47
S	-0.25	0.29	0.39	0.71

(注) Pはピアソンの相関係数

Tはデータを対数変換した場合のピアソンの相関係数

Sはスピアマンの順位相関係数

*は5%レベルで有意であることを示す

所=所得格差

地=地価格差

混=混雑度格差

全格差=所得格差×地価格差×混雑度格差×犯罪率格差×交通事故率格差

基づく場合が多い。

- ② 実際の転入・転出においては、情報認識と行動の遅れが伴う。

変数の選択においては、相関係数の値を参考にするが、その値の高い順に選択しても変数の組合せによっては内部相関が強くなりその結果

t 値が低くなったり符号条件が逆転する場合もあるので、考えられる種々の変数の組合せを行って t 値、符号条件、決定係数、作業仮説を総合的に判断し、最良と思われるモデルを選択した。

まず、表 3 の転入率では、相関係数の符号が正であるものを選択する。これは、格差が高まれば転入率も高まる関係を意味する。全格差は、符号条件が負であるので該当しない。同年の中で、それが正であるのは、所得格差、混雑度格差、所・混格差の三つである。その中から所・混格差を選択する。それは、混雑度格差より係数値が少し低い作業仮説で複数要因の相乗効果を重視していること、また混雑度格差を単独で用いると他の変数との内部相関が強くなるからである。

相乗効果をモデルとして作成する方法の一つに、データを対数変換して回帰分析を行う $Y = C \cdot (A^{\alpha} \cdot B^{\beta})$ 型のモデルがある。しかし、これは非線形の形状が限られており、また内部相関が強いため符号条件が逆転し、t 値がかなり低くなってしまう場合には使用できない。羽生市のモデルでは、内部相関が強く適用できなかった。

そのため、相乗効果は、各格差を掛け合わせた混合データで回帰モデルを作成する方法で取り入れることにした。また、関連の非線形性は、モデルの構造方程式の中にダミー変数を組み込む、あるいは、説明変数の将来値にテーブル関数を適用することで対処した。

次に、作業仮説②の遅れを考慮し、1 年遅れの中から所・地・混格差を選択した。この相関係数はあまり高くないが、後述するダミー変数を適用することで偏相関係数が 0.96 と適合率がかなり高くなる。なお、2 年遅れ、3 年遅れの要因は、同年、1 年遅れと内部相関が強いので除外した。

この所・地・混格差は、ピアソンの相関係数とスピアマンの相関係数との値に大きな相違が見られるので、相関図を描いてみた (図 3)。対象データは、比較的適合度の良い 1977～1985

表 4 転出率と格差の相関係数

格 差	同 年	1 年遅れ	2 年遅れ	3 年遅れ
P 所得格差	-0.14	0.56	0.17	-0.09
T	-0.13	0.56	0.15	-0.10
S	-0.14	0.50	0.11	-0.21
P 地価格差	-0.31	-0.27	0.01	0.22
T	-0.31	-0.27	0.00	0.22
S	0.07	-0.43	-0.18	0.00
P 混雑度格差	-0.19	-0.11	-0.18	-0.11
T	-0.18	-0.10	-0.17	-0.10
S	-0.18	-0.18	-0.18	-0.18
P 犯罪率格差	-0.15	-0.29	0.74 *	-0.55
T	-0.15	-0.31	0.73 *	-0.52
S	-0.04	-0.29	0.79 *	-0.79 *
P 交通事故率格差	-0.05	0.34	-0.18	0.07
T	-0.07	0.32	-0.21	0.06
S	-0.07	0.39	0.00	0.14
P 全格差	-0.36	-0.09	0.43	-0.26
T	-0.32	-0.09	0.41	-0.26
S	-0.46	-0.04	0.43	-0.25
P 所・地・混格差	-0.56	-0.14	0.03	0.19
T	-0.56	-0.12	0.02	0.18
S	-0.50	-0.07	-0.21	0.07
P 所・混格差	-0.17	0.36	0.05	-0.21
T	-0.16	0.37	0.05	-0.21
S	-0.39	0.43	-0.04	-0.14
P 所・地格差	-0.48	-0.11	0.09	0.28
T	-0.48	-0.10	0.09	0.28
S	-0.36	-0.04	0.00	0.04
P 地・混格差	-0.37	-0.29	-0.02	0.17
T	-0.37	-0.30	-0.04	0.16
S	-0.18	-0.64	0.00	-0.07

(注) P はピアソンの相関係数

T はデータを対数変換した場合のピアソンの相関係数

S はスピアマンの順位相関係数

* は 5% レベルで有意であることを示す

所 = 所得格差

地 = 地価格差

混 = 混雑度格差

全格差 = 所得格差 × 地価格差 × 混雑度格差 × 犯罪率格差 × 交通事故率格差

年の範囲である。この図から、1981 年と 1982 年の二つの値が右にシフトしているのが分かる。この年度に共通している特徴は、二つとも地価格差が特に大きくなっていることである (表 5)。地価格差が高いということは、県の平均地価に比較して市の地価が低いということで、地域環

表5 地価格差の推移（1年遅れ）

（単位：円/㎡）

年度	地価(県)	地価(市)	地価格差
1975	34,100	20,300	—
1976	44,300	24,300	1.67980
1977	45,260	24,600	1.82305
1978	47,800	24,100	1.83984
1979	54,000	26,600	1.98340
1980	72,600	30,700	2.03008
1981	91,400	37,900	2.36482
1982	107,000	56,300	2.41161
1983	117,000	60,100	1.90053
1984	119,000	60,600	1.94676
1985	120,000	60,900	1.96370

（注） 1年遅れのため例えば1976年の地価格差は1975年の値で計算している。

表6 転入率の回帰モデル

（転入率回帰モデル） 決定係数（自由度調整済み）＝0.92

$$Y = 0.01250 X_1 + 0.02193 X_2 - 0.01007 X_3 - 0.05185$$

(t=2.75) (t=8.03) (t=-6.82)

偏相関係数 (0.776) (0.963) (-0.950)

Y＝転入率

X₁＝所・混格差 X₂＝所・地・混格差（1年遅れ）

X₃＝ダミー変数（地価格差≥2.3の場合は1，それ以外は0を設定する）

境魅力を高める一つの要因になる。しかし、その値が、ある一定以上になると魅力を高める効果が薄れ、かえってマイナス要因になることも有り得る。地価の場合は、他の地域に比較して倍以上も低いということは、交通や買物等の利便性があまり良くないということも考えられるからである。

このような構造変化を回帰モデルの中に取り入れる手法として、ダミー変数を用いた。これは、地価格差がある一定以上を越えると1を、そうでない場合は0を設定する。

転入率の最終的な構造方程式は、前述の三つの変数（同年の所・混格差，1年遅れの所・地・混格差，ダミー変数）を用いて、表6のようになった。転入率との偏相関係数は、同年の所・混格差が0.78，1年遅れの所・地・混格差が0.96であり、後者の方が関連が高いことが分かる。また、ダミー変数を取り入れたことで他の説明変数の相関係数の値が高くなっていること

が分かる。

転出率は、表4において、相関係数の符号条件が負でなければならない。同年においては、値はそれほど高くはないがほとんどの項目において符号条件を満たしている。その中から、最も値が高い所・地・混格差を選択した。

1年遅れでは、地・混格差を選択した。その関連を図示したのが図4である。対象データは、比較的適合度の良い1978～1985年の範囲である。この場合も転入率と同様に地価格差が高いため1981年，1982年の値が右側にシフトしているので、ダミー変数を使用した。

転出率の最終的な構造方程式は、三つの変数（同年の所・地・混格差，1年遅れの地・混格差，ダミー変数）を用いて表7のようになった。転出率との偏相関係数は、同年の所・地・混格差が-0.83，1年遅れの地・混格差が-0.97となり、後者の方が転出率と関連が高いことが分かる。

表7 転出率の回帰モデル

(転出率回帰モデル) 決定係数 (自由度調整済み) = 0.94

$$Y = -0.00237 X_1 - 0.00909 X_2 + 0.00661 X_3 + 0.06432$$

(t=-3.02) (t=-8.72) (t=7.78)

偏相関係数 (-0.83) (-0.97) (0.97)

Y = 転出率

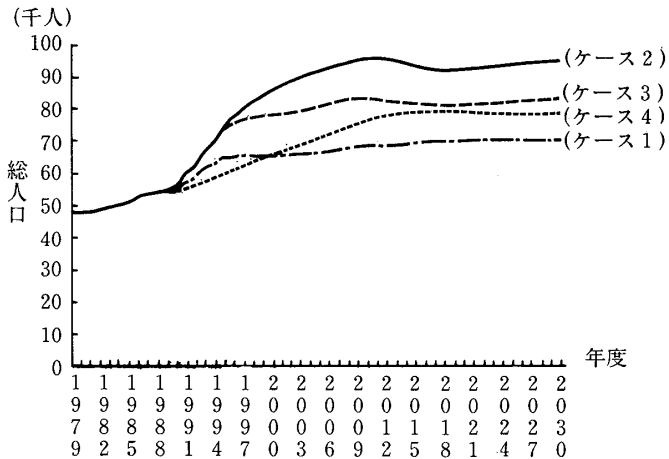
X₁ = 所・地・混格差 X₂ = 地・混格差 (1年遅れ)X₃ = ダミー変数 (地価格差 ≥ 2.3の場合は1, それ以外は0を設定する)

図5 ケース別予測人口の比較

4. モデルの検証とシミュレーション

転入率・転出率モデルの検証には、モデル自体のパラメータの検定と、SDの全システムを実行させ、その結果がどの程度過去の実績値に適合しているか、また、将来推計値の動態に矛盾がないかどうかを調べる全体テストがある。

転入率と転出率の構造方程式の回帰係数のt検定は、三変数とも十分良好な結果を示した。また、決定係数(自由度調整済み)は、転入率モデルが0.92、転出率モデルが0.94となった(表6, 表7参照)。この結果から、前節で述べた作業仮説の信頼性が高いことが推察される。

次に、図2のSD全システムを実行した結果、1979～1985年の転入数・転出数の誤差率(平方平均2乗パーセント誤差²⁾)は、0.03と0.02であり良好な適合率を示した。なお、所得格差、

表8 ケース別設定条件

ケース	テーブル関数適用の有無			モデルの型
	所得格差	地価格差	混雑度格差	
ケース1	×	×	×	開発促進型
ケース2	○	○	○	開発促進型
ケース3	○	○	×	開発促進型
ケース4	×	×	×	現状延長型

(注) ・テーブル関数は、図8の②を適用。

・開発促進型は、観光開発、宅地開発等における就業・居住人口の見込み増を計画年度に設定している。

・現状延長型は、開発計画による人口増を設定していない。

地価格差、混雑度格差は、SDモデル内部で決定される市の生産所得と人口、外性的に与えられる県の人口(埼玉県新長期構想に基づく)等を用いて推計される構造になっている。また、SDモデルの実行初年度は、年齢階層別のデータの有無の関係上1979年度にした。

モデルのシミュレーションは、このようなパラメータ検定と全体テストの後に行った。ここでは、種々の実行結果の中から、市の今後の開発計画の方針とテーブル関数適用の有無によるシミュレーションの実行結果の相違を中心に述べてみる。その結果が、図5である。実行結果は、開発促進型か現状延長型のケースの区別と所得格差、地価格差、混雑度格差にテーブル関数を適用したか否かによって、4種類のケースを設定してある(表8)。

ケース1～3は開発促進型で、ケース4は現状延長型である。開発促進型において3種類のケースを設定しているのは、市の観光開発等の積極的な促進効果により構造方程式の説明変数の将来推計値が大きく変動(特に地価格差)し、

$$2) \text{ 平方平均2乗パーセント誤差} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum \left(\frac{C - \hat{C}}{C} \right)^2}$$

T = シミュレーションを行った期間の長さ

C = 実績値

 \hat{C} = モデル値

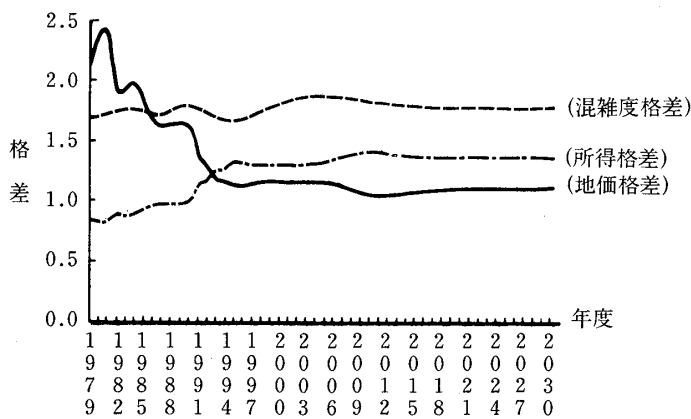


図6 格差の推移 (ケース1)

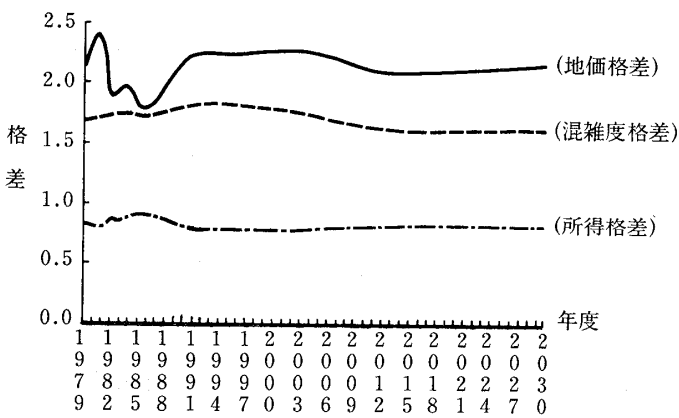


図7 格差の推移 (ケース4)

シミュレーションの実行結果に矛盾が生じるため、それへの対応策としてテーブル関数を適用し、それを適用しない場合に比較して総人口の推計値の動態がどのように変化するかを例示するためである。

羽生市では、21世紀に向けて国際的な消費流通系の産業（例えば、「ベルギー村」とオアシス産業（ふるさとサービス提供、例えば「羽生の里」、「新郷の里」）の振興等を計画している。

設立準備委員会で現在検討されている民間主導型の「ベルギー村」は、ベルギーの町並みを取り入れた、個性的で魅力のある、ヨーロッパの文化を日常的に楽しむことのできるアミューズメント基地で、併せて貴金属類の流通・販売の一大拠点にしたい意向である。また、「羽生の里」、「新郷の里」は、リゾート地として、優れた田園や集落、家並みなどを保全・整備し、ふるさとサービスを提供するオアシス産業基地

にする計画である。また、その他、ファンシー産業やアニメーション産業の誘致も提案されている。

このように、開発促進型のケースは、観光開発計画等を中心にしており、SDモデルの中では、それに伴う就業人口と宅地開発計画による居住人口の見込み増を該当年度に設定している。就業・居住人口が増加すると市の生産所得も増大し、その結果1人当たり市民所得に影響を及ぼす。その変化が、所得格差、地価格差を変動させ、転入率・転出率を変化させる要因の一つになる。

それに対して、現状延長型は、観光開発等の積極的な施策を行わないで現状の傾向性をそのまま延長するケースである。

ケース1と4は、3種の格差値をそのまま構造方程式に設定した場合であるが、開発促進型のケース1よりも現状延長型のケース4の方が、将来人口の伸びは高くなっている。

これは、格差の値の変動幅の大小が原因である。現状延長型のケース4は3種の格差の変動が比較的なだらかなっており（図7）、表6・表7の構造方程式のパラメータを決定するのに用いたデータ値の範囲から大きく変動していない。

それに対してケース1は、市における積極的な開発促進による効果で地価格差が1979～1995年まで大きく低下しているのが分かる（図6）。そのため転入率の伸びが抑えられ、転出率が相対的に高くなりすぎた結果として人口増加数がかなり抑制されている。これは、地価格差の低下が過大評価されているケースである。これは、構造方程式のパラメータを決定するときに使用した地価格差の時系列データ値の範囲が限られており、将来の地価格差が大きく変動する場合にそのパラメータを適用することの限界により起こる現象である。しかし、パラメータそのものの変化を推計することは容易ではないので、地価格差の値を修正することで代替した。

地価格差の値が低下しているとはいえ、1.1の近辺の値であり1以下ではなくマイナスの魅力要因にはなっていない。そこで、テーブル関

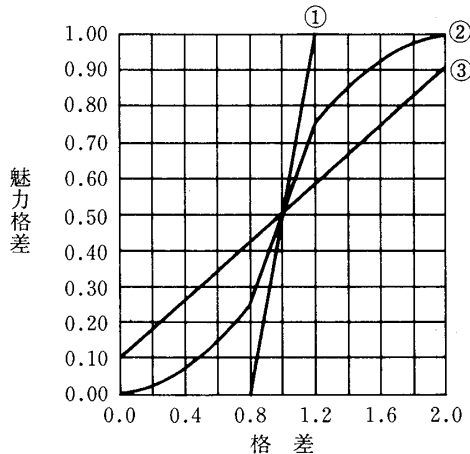


図8 格差と魅力格差の関連

数を用いて実質的な格差値（転入・転出率の変化に実質的に影響を与える魅力格差）に修正する必要がある。また、地価格差だけではなく、他の格差にも将来データの変動に対処するためテーブル関数を適用した。

格差の変化が地域環境魅力へ及ぼす影響度は、線形であるとは限らない。前述の構造方程式においても、地価格差の転入・転出率への関連の変化をダミー変数を用いて、ある一定以上の値を越えるとシフトさせている。

構造方程式を作成した場合の説明変数のデータの範囲以外にも、線形の他に非線形の関連を想定することも種々の状況設定として必要である。しかし、その範囲の過去の実績データが不足しているので、想定に際しては、シミュレーションの実行結果あるいは都市問題の実務家・有識者の意見等を参考にしながら徐々に修正していく仮説的な主観値とならざるをえない。

設定においては、図8のような関連をテーブル関数を用いて行う。テーブル関数では、データ範囲をいくつか分割し、それを直線補間する方法で二つの変数間の任意な非線形な関係を自由に取り扱うことができる。

テーブル関数では、種々の設定が可能である。例えば、図8では3種類のケースを例示している。この図の魅力格差とは、転入・転出率の変化に実質的に影響を与える格差のことを意味している。

格差が1の場合は、地域間の水準が同等であ

り魅力格差は1となる。これは、3ケースとも同様であるが、その前後の範囲で格差と魅力格差の関連が異なっている。関連の反応度で区別すると、①は敏感なケース、②は標準、③は鈍感なケースということもできるだろう。ここでは、②のケースを用いたシミュレーションの実行結果を示しておく。格差が1に近い範囲では反応が敏感で、それ以外は通減するケースである。

格差の値にこの②の関連を示すテーブル関数を適用したのがケース2とケース3である（図5）。ただし、ケース3の混雑度格差にはそれを適用していない。それは、図6の混雑度格差の推移が他の格差に比較して安定しているため、テーブル関数を使用しないケースを設定してみた。しかし、所得格差の上昇により経済的魅力が増している状況においては、混雑度格差による魅力度が相対的に高まることも考えられる。人々は、経済的に活況を帯びている地域では、そうでない地域よりも同等の空間的ゆとりにより魅力を感じるという状況設定である。それが、ケース2である。

テーブル関数は、必要に応じて、転入・転出別、3種類の格差別の6種類ごとに設定する個別的な適用も考えられる。しかし、テーブル関数の型によって、シミュレーションの結果に大きな変化が起こり得るので、その適用においては十分な注意と検討が必要である。

おわりに

SDは、シミュレーション用言語、データ解析とシミュレーション、社会システム論等の種々の領域を包含する総合的な手法である。本稿では、事例研究に基づいてデータ解析とシミュレーションを中心に展開した。その内容は、定性的概念の定量化におけるパラメータの設定に多変量解析を用いてデータ解析を行い、その結果をもとにシミュレーションを行った。

SDにおける定性的概念の定量化手法には、テーブル関数、回帰分析が多く適用されている。前者は、データが不足しているときに仮の設定

を行い、非線形の関係も自由に扱える利点があるが、過去の実績値に適合させる作業に多大な時間がとられる場合が多い。後者は、定性的概念の定量的代理指標とそれを構成する各種要因の時系列データが入手可能な場合に有効で、過去のデータ間の関連を効率的に分析することが可能であるが、必ずしも説明力の高いモデルが作成できるとは限らない。また、構造方程式のパラメータは、説明変数の将来推計値が過去の実績値の範囲から大きく変動する場合には、その有効性に限界が生じるケースもある。

両者には、このように種々の利点と問題点があげられるが、本稿では羽生市ダイナミックモデルに二つの手法を総合して適用した。

具体的には、地域環境魅力という定性的概念を転入率・転出率という代理指標でとらえ、それを推定する重回帰モデルを作成した。また、説明変数の将来推計値が大きく変動する場合のパラメータの限界とデータの非線形性を考慮し、転入・転出率モデルの説明変数の将来推計値にテーブル関数を適用した。また、その適用の有無、あるいはテーブル関数の種類と組合せによってどのようにシミュレーションの実行結果に相違を生じるかを例示した。

本稿において説明した地域環境魅力の定量化手法は、既存のデータを有効に利用する実用的なものとなっている。多数の要因を考慮してもデータの作成やパラメータの設定等に多大な時間と労力が要求され、その割には精度も不完全で非実用的なモデルになる可能性も少なくない。

短期間でSDモデルを開発しなければならない場合は、シミュレーションモデルの初期の目的を達成できる範囲内で、実用的なモデルを効率的に作成することが要求される。

今回は、マクロ的なデータをもとにモデル化した但、理論的根拠を前提にしているとはいえず統計学的処理においては疑似相関の可能性を完全に否定できない。そこで、転入・転出に関する追跡調査等のミクロ的なアプローチを併せて行えば、その信頼性はさらに増すと思われる。

SDに関わる今後の課題としては、種々の手法の研究・開発は当然必要であるが、非公開性の傾向を改めて、研究事例の詳細な内容を広く公開できる体制を整えることも重要である。

SDの今後の応用は、種々の可能性に満ちたものがある。例えば、人間の心身両面にわたる活動が、どのように自己完成へと生命を昇華させ社会を変革していけるかという生命論的アプローチによるHuman DynamicsあるいはLife Dynamicsともいふべき領域も考えられよう。そのためには、その基礎的段階として、定性的概念の定量化手法の種々の事例研究が必要である。また、それをデータベース化し、効率的な情報の総合化やシステム分析が可能となるようなSD支援システムの開発も必要となるだろう。

(謝 辞)

本稿をまとめるにあたり、貴重なコメントと資料を提供して戴いた流通経済大学の百合本茂教授、市川新助教授に深く感謝致します。